

М.І. СОКУР, докт. техн. наук, проф.; **Л.М. СОКУР**, ст. викладач;
І.М. СОКУР, науковець, Кременчуцький державний університет
ім. М. Остроградського, м. Кременчук

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ В ПОЛІ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ

Запропонована гіпотеза, згідно з якою процес руйнування твердого матеріалу з достатньою вірогідністю описується рядом визначеної геометричної прогресії. Розроблена математична модель процесу дезінтеграції твердих мінеральних ресурсів вільним ударом в полі відцентрових сил, яка відображає закономірності і фізичну сутність процесів в робочій камері дезінтегратора і описує якісну картину руйнування матеріалу у дезінтеграторі відцентрового типу.

Offered hypothesis in obedience to which the process of destruction of hard material is described in certain geometrical progression. The mathematical model of disintegration process of hard mineral resources a free-kick is developed in the field of centrifugal forces, which represents conformities to law and physical essence of processes in the working chamber of disintegrator and describes the process of destruction of material in the disintegrators of centrifugal type.

Вступ. Дезінтеграція (дроблення і подрібнення) твердих мінеральних ресурсів є надзвичайно трудоемним і енергоємним процесом, на долю якого припадає 65 – 70 % енергетичних, капітальних і експлуатаційних витрат. При цьому по дослідженнях авторів, витрати на дроблення складають лише 5 %, а на подрібнення 60 – 65 %, тобто витрати на подрібнення на порядок вищі, чим на дроблення.

Тому пропонується концепція перерозподілу енерго і трудозатрат між циклами дроблення і подрібнення в напрямку збільшення питомої ваги циклу дроблення в загальному процесі дезінтеграції мінеральних ресурсів. Перспективною науковою стратегією в цьому напрямку, науково обґрунтованою авторами, є зниження крупності дробимого продукту з 25 – 30 мм до 5 – 10 мм, так як кожний міліметр зменшення крупності продуктів дроблення дозволяє на 1 – 1,5 % знизити енергоємність і на стільки ж підвищити продуктивність циклів подрібнення [1 – 5].

Таку крупність дробимого продукту можна отримати в апаратах нового покоління, найбільш перспективним з яких є дезінтегратори відцентрового типу, в яких реалізується принцип руйнування твердих мінеральних ресурсів вільним ударом в полі відцентрових сил [5].

Для широкого впровадження цієї інноваційної розробки необхідно створити теоретичну базу, яка дозволить науково обґрунтовано розробляти нові конструкції відцентрових дезінтеграторів, які задовольняють вимогам запропонованої стратегії в галузі переробки твердих мінеральних ресурсів.

Мета роботи. Основною метою досліджень було розробка математичних моделей і теоретичних основ процесу дезінтеграції твердих мінеральних ресурсів, які відображають фізичну сутність процесів в робочій камері дезінтегратора.

Матеріали і результати досліджень. У більшості традиційних апаратів при дезінтеграції (дробленні і подрібненні) мінеральної сировини руйнування матеріалу відбувається в результаті його роздавлювання або тертя. Перспективним способом дезінтеграції твердого матеріалу представляється його руйнування вільним ударом у полі відцентрованих сил, що дозволяє зменшити питомі витрати електроенергії та забезпечує селективне розкриття корисного компонента.

Спосіб руйнування матеріалу ударом в полі відцентрових сил реалізується в апаратах відцентрового типу - відцентрових дезінтеграторах. Створення таких апаратів вимагає нових теоретичних підходів до процесу руйнування матеріалу (рисунок).

Пропонується гіпотеза, згідно з якою процес дроблення куска матеріалу об'ємом V можна представити рядом визначеної геометричної прогресії. Наприклад, у результаті експериментів дослідним шляхом встановлено, що кусок матеріалу об'ємом V , отримавши певне прискорення на робочому органі відцентрового дезінтегратора, летить в полі відцентрових сил і при ударі об жорстку перешкоду (відбійні плити дезінтегратора) руйнується на n шматків. При цьому отримано один кусок об'ємом $\frac{1}{2} V$, другий кусок об'ємом $\frac{1}{4} V$, третій об'ємом $\frac{1}{8} V$ і т.д.

Таким чином, у даному випадку знаменник ряду дорівнює 2, 4, 8, 16... 2^k а сам ряд, а отже, і схема руйнування вихідного куска об'ємом V може бути описана геометричною прогресією види:

$$V = \frac{V}{2} + \frac{V}{4} + \frac{V}{8} + \frac{V}{16} + \dots + \frac{2V}{2^K} \quad (1)$$

У цьому ряді останній член має коефіцієнт 2, так як, передбачається, що

найменша частка подрібненого матеріалу не може бути менше двох об'ємів молекул, тому, що механічним шляхом зруйнувати речовину до молекулярного рівня неможливо.

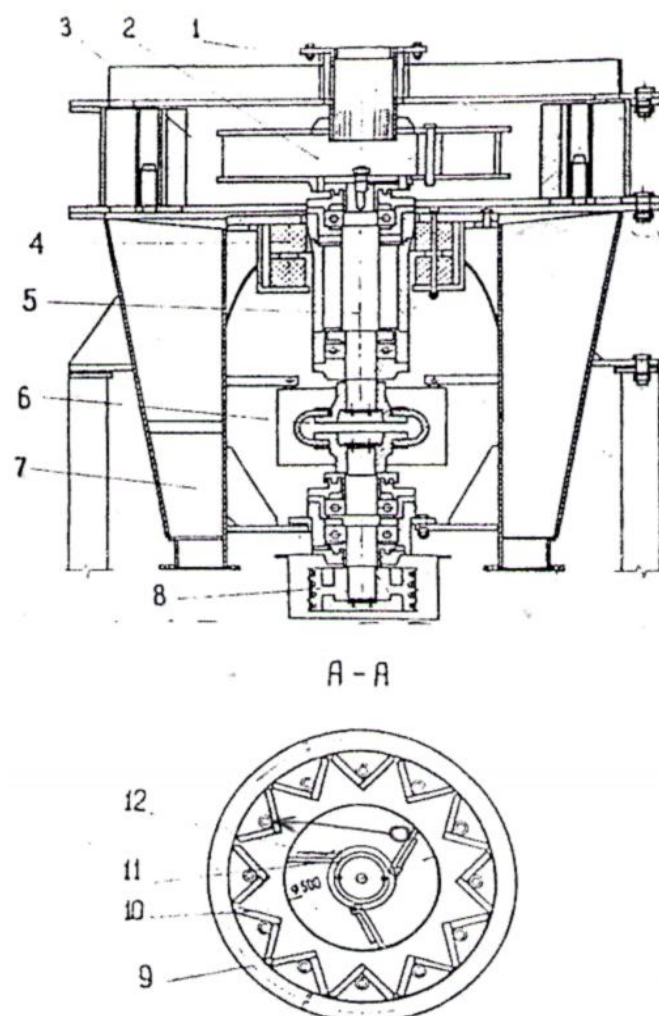


Рисунок – Особливості конструкції і принцип роботи дезінтегратора відцентрового типу:

- 1 – завантажувальний пристрій, 2 – розгінний ротор, 3 – відбійні плити,
4 – підвіска, 5 – вал ротора, 6 – муфта, 7 – розвантажувальна тічка,
8 – шків приводу ротора, 9 – обичайка, 10 – відбійні плити вугільної форми,
11 – розгінні ребра, 12 – зносостійка пластина

За інших умов експерименту (обсяг куска, міцність, швидкість) матеріал може руйнуватися за наступною схемою:

$$V = \frac{2}{3}V + \frac{2}{9}V + \frac{2}{27}V + \dots + \frac{2}{3^K - 1}V + \frac{2V}{3^K} \quad (2)$$

Для різних умов можливі й інші схеми руйнування матеріалу, але всі во-

ни в загальному випадку описуються геометричною прогресією виду:

$$V = \frac{n-1}{n}V + \frac{n-1}{n^2}V + \frac{n-1}{n^3}V + \dots + \frac{n-1}{n^{k-1}}V + \frac{n}{n^k}V \quad (3)$$

Показник ступеня в цих рівняннях визначається з формул:

$$\frac{V}{n^K} \geq V_{МОЛ}; V_{МОЛ} = \frac{M}{\rho \cdot N_A}; \ell_q V - k \ell_q n \geq \ell_q V_{МОЛ}; k \leq \frac{\ell_q V - \ell_q V_{МОЛ}}{\ell_q n}; \quad (4)$$

де $V_{МОЛ}$ – об'єм молекули, V – об'єм куска матеріалу, M – маса граммамолекули речовини, ρ – дійсна щільність; N_A – число Авогадро для грам-молекули речовини ($N_A = 6,02 \cdot 10^{-23}$)

У тому випадку, коли кусок вихідного матеріалу має об'єм 1 м^3 , наведені вище ряди будуть мати вигляд:

$$1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots + \frac{1}{2^{K-1}} + \frac{2}{2^K} \quad (5)$$

$$1 = \frac{2}{3} + \frac{2}{9} + \frac{2}{27} + \dots + \frac{2}{3^{K-1}} + \frac{2}{3^K} \quad (6)$$

$$1 = \frac{n-1}{n} + \frac{n-1}{n^2} + \frac{n-1}{n^3} + \dots + \frac{n-1}{n^{K-1}} + \frac{n}{n^K} \quad (7)$$

Таким чином, ґрунтуючись на запропонованому підході та уявленні дроблення куска вихідного матеріалу рядом геометричної прогресії зазначеного вище виду, ми можемо прогнозувати кількість і розміри всього спектру отриманих з початкового куска осколків. Далі розглянемо механізм руйнування куска матеріалу, що летить в полі відцентрових сил, при ударі його об жорстку перешкоду. Приймаються вихідні умови: поперечний розмір куска менше товщини твердої перешкоди (броні), тобто $\delta_{\delta p} \geq \delta_k$; час проходження звуку через броню більше, ніж через кусок матеріалу $t_{зв.бр.} \geq t_{зв.к.}$; межа пружності на стиск куска G менше відношення сили що діє на нього, до площі кус-

ка $\frac{F_K}{S_K}$; кусок матеріалу має овальну форму, близьку до форми кулі діаметром d (або радіусом r). Кусок матеріалу розганяється до швидкості V робочим органом відцентрового дезінтегратора - розгінним ротором і рухається в полі відцентрових сил до зустрічі з жорсткою перепорою - відбійними плитами (футеровкою) дезінтегратора. Удар прямий, центральний, тобто під кутом 90° , перпендикулярно плиті. Тоді найбільша площа поперечного перерізу куска матеріалу:

$$S = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Згідно з другим законом Ньютона, сила, з якою вдаряється кусок об плиту дорівнює:

$$F = m \cdot a$$

де m – маса куска руди, кг; a – прискорення куска, що отримується при зупинці (погашення швидкості до нуля); F – сила, що діє на кусок, кг. Маса матеріалу дорівнює:

$$m = \rho \cdot V_0 = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = \rho \frac{\pi d^3}{6}$$

де ρ – щільність матеріалу, кг/м³, V_0 – об'єм куска матеріалу, м³.

Тоді сила, що діє при ударі, дорівнює:

$$F = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3}{6} \cdot a \quad (8)$$

За час удару прискорення складе

$$a = \frac{v}{t} \quad (9)$$

де v – швидкість при ударі; t – час дії сили.

Виходячи з припущення про те, що час дії сили відповідає часу розпо-

всюдження пружних хвиль у куску матеріалу при вільному ударі, запишемо

$$t = \frac{d}{u} \quad (10)$$

де u – швидкість поширення пружних хвиль у матеріалі (швидкість звуку).

З урахуванням формул 9 і 10 визначимо силу, що діє при вільному ударі:

$$F = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3 \cdot v \cdot u}{6d} \quad (11)$$

Умова міцності куска матеріалу має вигляд:

$$\frac{F}{S} \leq [G] \quad (12)$$

де $[G]$ – допустима напруга руйнування даного матеріалу; S – площа поперечного перерізу куска матеріалу,

$$S = \frac{\pi d^3}{4} \quad (13)$$

З урахуванням виразів (11) і (13) умова міцності куска буде мати вигляд:

$$\frac{\frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3 \cdot v \cdot u}{6d}}{\frac{\pi d^3}{4}} \leq [G] \quad (15)$$

Після простих перетворень одержимо:

$$\frac{2}{3} \rho \cdot v \cdot u \leq [G] \quad (16)$$

Тоді умова міцності отримуємо у вигляді

$$v \leq \frac{3}{2} \cdot \frac{[G]}{\rho \cdot u} \quad (17)$$

Звідси, очевидно, умова руйнування матеріалу при вільному прямому ударі в полі відцентрових сил

$$v \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{[G]}{\rho \cdot u} \quad (18)$$

При визначенні руйнівної швидкості при непрямому ударі необхідно враховувати величину кута зустрічі куска матеріалу з жорсткою перешкодою (відбійними плитами відцентрового дезінтегратора)

$$v \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{[G]}{\rho \cdot u \cdot \sin \lambda} \quad (19)$$

Чим менше $\sin \lambda$, а значить і кут зустрічі, тим більше повинна бути гранична швидкість вильоту частинки. Наприклад для $\lambda = 30^\circ$ вона зростає в два рази в порівнянні з граничною швидкістю при куті зустрічі $\lambda = 90^\circ$. Можна припустити, що розрахована за формулою (19) $v_{\text{гран}}$ – гранична мінімальна швидкість, при якій кусок матеріалу починає руйнуватися – забезпечує його мінімальне руйнування і призводить до зменшення його поперечного розміру в 2 рази, (тобто ступінь скорочення куска дорівнює 2). При необхідності зменшення крупності вихідного матеріалу в 3 рази швидкість повина бути збільшена в 1,5 рази, для зменшення крупності в 4 рази, швидкість вильоту має бути збільшена 2 рази і т.д. Таким чином, для забезпечення необхідного ступеня скорочення матеріалу n , в отримані формули необхідно ввести коефіцієнти, рівний $n/2$. Тоді необхідну швидкість вильоту матеріалу з робочого барабана відцентрового дезінтегратора для забезпечення необхідного ступеня скорочення можна розрахувати за такою формулою:

$$v = \frac{2}{3} \cdot \frac{[G]}{\rho u 4} \cdot \frac{n}{2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{G \cdot n}{\rho \cdot u} \quad (20)$$

(для дезінтегратора, що забезпечує своєю конструкцією максимальний кут зустрічі $\lambda = 90^\circ$ роздрібнюваного матеріалу з відбійними плитами).

$$v = \frac{3}{4} \cdot \frac{[G] \cdot n}{\rho \cdot u \cdot \sin \lambda} \quad (21)$$

(при куті λ зустрічі матеріалу з відбійними плитами).

Величина ρu , що стоїть в знаменнику виведених формул, являє собою акустичну жорсткість матеріалу. Таким чином, виходячи з наведених аналітичних залежностей, акустична жорсткість є одним з критеріїв інтенсивності при руйнуванні матеріалу вільним ударом. Введемо для неї загальноприйняте позначення:

$$A = \rho \cdot u$$

і отримаємо остаточну формулу для визначення швидкості вильоту матеріалу з розгінного ротора дезінтегратора, що забезпечує необхідне руйнування матеріалу.

$$v = \frac{3}{4} \cdot \frac{[G] \cdot n}{A \cdot \sin \lambda}$$

Висновки.

Таким чином, встановлена закономірність процесу руйнування твердих кускових мінеральних ресурсів вільним ударом в полі відцентрових сил, яка відображає фізичну сутність процесів в робочій камері дезінтегратора і рекомендується використовувати як для опису якісної картини руйнування матеріалу у відцентровому дезінтеграторі, так і для розрахунку швидкісних режимів роботи при проектуванні відцентрових дезінтеграторів.

Список літератури: 1. Сокур Н.И. Экономия энергоресурсов при дезинтеграции минерального сырья / Н.И. Сокур // Пути экономии ресурсов при обогащении руд. – 1999. – С. 3 – 8. 2. Сокур Н.И. Центробежные дезинтеграторы для мелкого дробления минерального сырья / Н.И. Сокур, С.А. Учитель, А.Ф. Калиниченко // Оборудование для дезинтеграции минерального сырья. – 1992. 3. Сокур Н.И. К вопросу разрушения минерального сырья в поле центробежных сил / Н.И. Сокур // Новые технологии для переработки руд. – 1993. 4. Бабець Є.К. Управління енергозбереженням в процесах рудо підготовки / Є.К. Бабець, М.І. Сокур. – Кривий Ріг: Мінерал, 2002. – 410 с. 5. Сокур М.І. Центробежные дробилки / М.І. Сокур, І.М. Сокур, Л.М. Сокур. – Кременчуг: ЧП Щербатих, 2009. – 300с.

Надійшла до редколегії 20.08.2010